

ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL SISMO DE PISCO, PERÚ DEL 15 DE AGOSTO DEL 2007¹

Adrián Rodríguez-Marek², Jorge E. Alva Hurtado³, Brady Cox⁴, Jorge Meneses⁵, Gonzalo A. Montalva⁶, Viviana Moreno⁷, Manuel Olcese⁷, Rodolfo Sancio⁸, Joseph Wartman⁹

Resumen: Este artículo presenta un resumen de las observaciones realizadas durante un reconocimiento de los efectos geotécnicos del sismo de Pisco ocurrido el 15 de agosto del 2007 en la zona central de la costa del Perú. Este sismo de magnitud (M_w) 8.0 causó daños importantes a obras de ingeniería civil en una amplia zona que incluye las ciudades de Ica, Pisco, Cañete y Chincha. Desde una perspectiva geotécnica, los aspectos más relevantes de este sismo son la gran extensión de licuación de suelo observada en la zona mesosísmica y el considerable daño que causó en las zonas urbanas y en la infraestructura de transporte. En particular se destaca la documentación de un deslizamiento lateral que involucró un área de al menos 3 km² de terreno y asentamientos de hasta 0.9 m observados en estructuras livianas. El sismo también causó varios deslizamientos de talud que resultaron en bloqueos de carreteras. También se presenta un análisis preliminar de los registros de aceleraciones obtenidos durante el sismo.

Palabras clave: desplazamiento lateral, movimientos del terreno, licuación, observaciones en terremotos, sismo de Pisco.

GEOTECHNICAL ASPECTS OF THE AUGUST 15, 2007 PISCO, PERU EARTHQUAKE

Abstract: This paper summarizes geotechnical observations of the August 15, 2007 Pisco earthquake that took place in the central coast of Peru. This M_w 8.0 earthquake caused significant damages to civil infrastructure in a wide area that included the cities of Ica, Pisco, Cañete, and Chincha. From a geotechnical perspective, the most important aspects of this earthquake are the large extent of observed soil liquefaction in the mesoseismic area, and the significant damage liquefaction caused to urban areas and the transportation infrastructure. Two particular case histories include a lateral spread that involved an area of 3 km² and liquefaction-induced settlements up to 0.9 m in lightweight structures. The earthquake also caused various landslides that resulted in road closures. A preliminary analysis of the strong motion records obtained during the earthquake mainshock is also presented.

Keywords: earthquake observations, lateral spread, liquefaction, Pisco earthquake, strong ground motion.

INTRODUCCIÓN

El miércoles 15 de agosto de 2007, a las 6:40 PM hora local, un sismo de magnitud 8.0 en la escala de momento sacudió la región costera de Perú central. El sismo ha sido referido como el sismo de Pisco o el de Ica (Pisco fue la ciudad más afectada, e Ica es el departamento donde las ciudades de Pisco e Ica están localizadas). En este artículo se usará la denominación “sismo de Pisco”. El sismo causó daños severos a las ciudades de Pisco, Ica, Cañete y Chincha, y se sintió fuertemente en Lima, la ciudad capital de Perú. En respuesta a este evento, la organización de Ingeniería

1 Artículo recibido el 10 de octubre de 2007 y en forma revisada el 15 de noviembre de 2007.

2 Civil & Environmental Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA 99164-2910. E-mail: adrian@wsu.edu

3 Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Rimac, Lima 25, Perú. E-mail: jalvah@terra.com.pe.

4 Department of Civil Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, AR 72701. E-mail: brcox@uark.edu.

5 Kleinfelder, Inc., 5015 Shoreham Place, San Diego, CA 92122. E-mail: jmeneses@kleinfelder.com.

6 Universidad de Concepción, Chile (actualmente alumno de doctorado en Washington State Univ.). E-mail: gmontalva@ad.wsu.edu.

7 Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria N° 1801, San Miguel, Lima, Perú. E-mails: vmoreno@pucp.edu.pe, suelos@pucp.edu.pe.

8 Golder Associates, 500 Century Plaza Drive, Suite 190, Houston, TX 77073. E-mail: Rodolfo_Sancio@golder.com.

9 Civil, Architectural & Environmental Eng. Dept., Drexel University, Philadelphia, PA 19104. E-mail: joseph.wartman@drexel.edu.

Geotécnica de Reconocimiento Sísmico (GEER, por su nombre en inglés) con apoyo financiero de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NSF), organizó un equipo de reconocimiento para documentar los aspectos geotécnicos del sismo. El equipo del GEER arribó al Perú el 20 de Agosto de 2007, y permaneció en la zona afectada por seis días. El equipo visitó las ciudades de Lima, Paracas, Pisco e Ica, y recorrió los caminos de norte a sur que conectan estas ciudades con otros pueblos costeros más pequeños (véase el mapa en la Figura 1). Además, el equipo de reconocimiento recorrió el camino principal que conecta Pisco con la ciudad de Ayacucho para documentar la extensión de las fallas geotécnicas hacia el interior.



Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Figura 1: Vista general de la zona afectada. Las líneas azules indican los caminos recorridos por el equipo de reconocimiento del GEER. Mapa base cortesía de Google Earth.

Desde la perspectiva geotécnica, los aspectos más relevantes del sismo de Pisco son la gran extensión de licuación de suelo observada en la zona mesosísmica y el considerable daño que causó en las zonas urbanas y en la infraestructura de transporte. Siguiendo a la sección introductoria, este reporte presenta consideraciones sismológicas, incluyendo una discusión de los registros obtenidos, licuación de suelo junto con sus efectos y deslizamientos de tierra ocurridos a lo largo de las principales carreteras. Este artículo pretende únicamente detallar observaciones y datos recolectados durante el reconocimiento realizado, dejando de lado análisis exhaustivos y el desarrollo de hipótesis acerca de posibles mecanismos de falla para cuando se obtenga la información y documentación que permita tales análisis. Este reporte no documenta todos los antecedentes recabados por el equipo del GEER, más bien es un resumen que pretende arrojar luz sobre algunos de los aspectos geotécnicos más importantes del sismo de Pisco.

Resumen de daños e intensidades observadas

El sismo de Pisco causó severos daños dentro de su área mesosísmica. Datos oficiales emitidos el 13 de noviembre del 2007 por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) del Perú indican que fallecieron 519 personas y resultaron heridas 1,291 personas (INDECI, 2007). El INDECI también reportó que cerca de 94,000 construcciones fueron destruidas o no se consideran habitables.

El Instituto Geofísico del Perú reportó intensidades en la escala modificada de Mercalli de VII en las ciudades de Pisco, Chíncha y Cañete, V a VI en Lima, III en Cuzco, y II en Arequipa (Tavera et al., 2007). Además, el sismo fue sentido en las ciudades de Quito, Ecuador; La Paz, Bolivia y en Manaus, Brasil (USGS, 2007). El sismo generó un tsunami que causó considerables daños en la ciudad de Paracas en Perú e inundó porciones de muchas otras ciudades y pueblos a lo largo de la costa.

ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y REGISTROS SÍSMICOS

Aspectos sismológicos

El sismo de Pisco del 15 de agosto de 2007 fue el resultado del proceso de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana. La convergencia de estas placas provoca una alta sismicidad a lo largo de las costas de Perú y Chile. El sismo de Pisco es un evento interplaca que ocurre en una brecha sísmica (“seismic gap”) identificada con anterioridad (Tavera y Bernal, 2005) entre las zonas de ruptura de los eventos de Lima 1974 y Nazca 1996. La magnitud del sismo de Pisco fue de 8.0 (M_w , escala de momento), de acuerdo a lo reportado por USGS (2007). El hipocentro se localizó a 13.76° de latitud sur y 76.97° de longitud oeste, a una profundidad de 39 km. La ruptura de la falla se propagó de norte a sur desde el hipocentro (Tavera et al., 2007). La solución de Ji y Zeng (2007) para el área de ruptura sugiere una ruptura de 324° de rumbo y 27° de buzamiento, con dimensiones aproximadas de 190 km de largo y 95 km de ancho (Figura 2). Las ubicaciones de los hipocentros correspondientes a las réplicas coinciden con este plano de ruptura (Tavera et al., 2007). El bajo buzamiento y gran ancho del plano de falla hacen que las ciudades más afectadas por el sismo, Pisco e Ica, estén ubicadas sobre la proyección vertical del plano de falla. El modelo de Ji y Zeng (2007) indica una ruptura compleja con dos zonas de altos deslizamientos en el plano de ruptura (Figura 2).

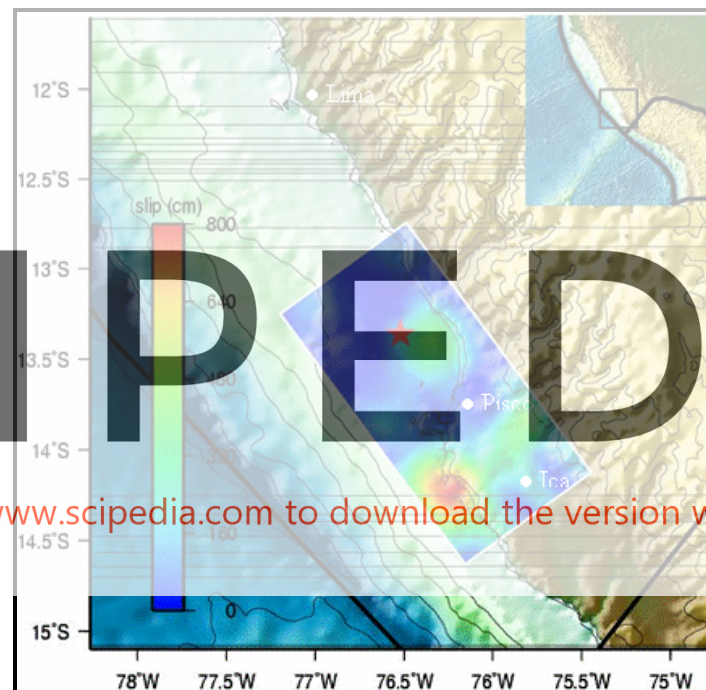


Figura 2: Solución de falla finita de Ji y Zeng (2007). Ubicación aproximada de principales ciudades (modificada de Ji y Zeng 2007).

Registros sísmicos

El sismo de Pisco registrado por 16 instrumentos ubicados a distancias no mayores a 150 km del plano de falla (las distancias fueron calculadas usando el plano de ruptura obtenido de Ji y Zeng, 2007). La Tabla 1 muestra los 16 instrumentos que registraron el movimiento junto con información relevante acerca de los parámetros de cada registro. Las ubicaciones de estas estaciones se muestran en la Figura 3. Es importante destacar que todos los registros, con excepción de los obtenidos en Ica, corresponden a instrumentos ubicados al norte del plano de falla a una distancia aproximada de 100 km, en las cercanías de la ciudad de Lima. Un gráfico de PGA (aceleración horizontal máxima del suelo) versus distancia más próxima al plano de falla, incluyendo los 16 registros, se presenta en la Figura 4. Para efectos de referencia, las predicciones de la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003) para suelo y roca se han incluido en la misma figura. En el gráfico se puede observar que el registro de Ica (Parcona) posee un PGA próximo a 0,5g, lo que supera la predicción para suelo de la relación de atenuación de Atkinson y Boore en más de un 85%, mientras que los PGAs de los registros cercanos a Lima no superaron el percentil 15 de la misma ley de atenuación. El tipo de suelo correspondiente a cada estación se estimó a partir de mapas de zonificación local (Aguilar y Alva, 2007) y de Tavera et al. (2007). Se observa una tendencia a mayores PGAs en las estaciones ubicadas sobre suelo.

Tabla 1: Estaciones acelerográficas que registraron el sismo de Pisco.

| Organización (a) | Código | Ubicación | Ciudad | PGA vert. (cm/s ²) | PGA NS (cm/s ²) | PGA EO (cm/s ²) | PGA (g) | Distancia más próxima (km) (b) | Tipo de Suelo (c) |
|---------------------|---------------------------|---------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------|---|-------------------------|
| IGP | PCN | Parcona | Ica | 301.0 | 455.0 | 488.0 | 0.498 | 39.4 | Suelo |
| IGP | MAY | Mayorazgo | Lima | 31.2 | 59.7 | 55.0 | 0.061 | 103.0 | Suelo |
| IGP | ANC | Ancón | Ancón | 27.8 | 54.7 | 58.4 | 0.060 | 137.5 | Suelo |
| IGP | LMO | La Molina | Lima | 14.2 | 21.2 | 25.3 | 0.026 | 100.3 | Roca |
| IGP | NNA | Ñaña | Lima | 21.6 | 18.7 | 22.1 | 0.023 | 105.4 | Roca |
| CISMID | ICA2 | Universidad | Ica | 192.2 | 334.1 | 272.3 | 0.341 | 36.7 | Suelo |
| CISMID | CISMID | Rimac | Lima | 32.9 | 45.1 | 73.9 | 0.075 | 111.1 | Suelo |
| CISMID | CDL-CIP | San Isidro | Lima | 33.1 | 58.8 | 54.1 | 0.060 | 103.7 | Firme Suelo |
| CISMID | La Molina | La Molina | Lima | 56.8 | 69.1 | 78.7 | 0.080 | 96.8 | Firme Suelo |
| CISMID | DHN | El Callao | El Callao | 31.6 | 101.0 | 95.8 | 0.103 | 111.1 | Suelo |
| PUCP | PUCP | U. Católica | Lima | 39.7 | 59.6 | 67.0 | 0.068 | 106.7 | Blando Suelo |
| CERESIS | RIN | Rinconada | Lima | 57.7 | 115.0 | 111.0 | 0.117 | 99.3 | Firme Suelo |
| CERESIS | ANR | A. Nac. Rectores | Lima | 73.5 | 65.2 | 85.3 | 0.087 | 100.1 | Suelo Firme |
| CERESIS | CER | Ceresis | Lima | 37.3 | 58.0 | 58.7 | 0.060 | 102.4 | Suelo Firme |
| Sedapal | E1 ^(d) | Atarjea | Lima | 30.4 ^(d) | 50.0 ^(d) | 54.9 ^(d) | 0.056 | 106.2 | Suelo |
| Sedapal | E2 | Atarjea | Lima | 11.8 | 12.7 | 20.6 | 0.021 | 105.9 | Roca |

(a) IGP: Instituto Geofísico del Perú (<http://www.igp.gob.pe/>).

CISMID: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (<http://www.cismid-uni.org/>).

PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú (<http://www.pucp.edu.pe/>).

CERESIS: Centro Regional de Sismología para América del Sur (<http://www.ceresis.org/new/es/index.html>).

Sedapal: (<http://www.sedapal.com.pe/>).

(b) Medido desde el plano propuesto por Ji y Zeng (2007).

(c) Inferido de mapas de zonificación local (Aguilar y Alva 2007) y de Tavera et al. (2007), pueden ser consideradas sólo una estimación. Las estaciones en suelo firme son aquellas ubicadas en el llamado "Conglomerado de Lima", un depósito de grava denso con algo de cementación.

(d) La estación E1 está en la ubicación en la cresta de un terraplén.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

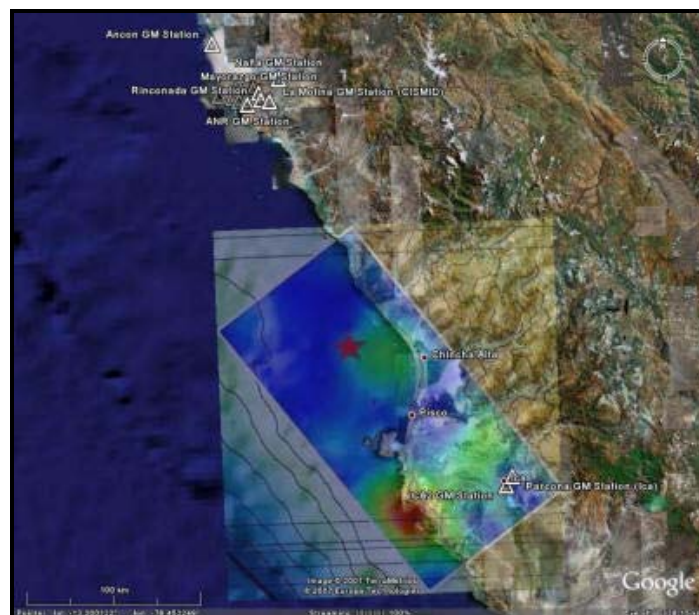


Figura 3: Ubicación de las estaciones (indicadas con triángulos). Mapa base cortesía de Google Earth.

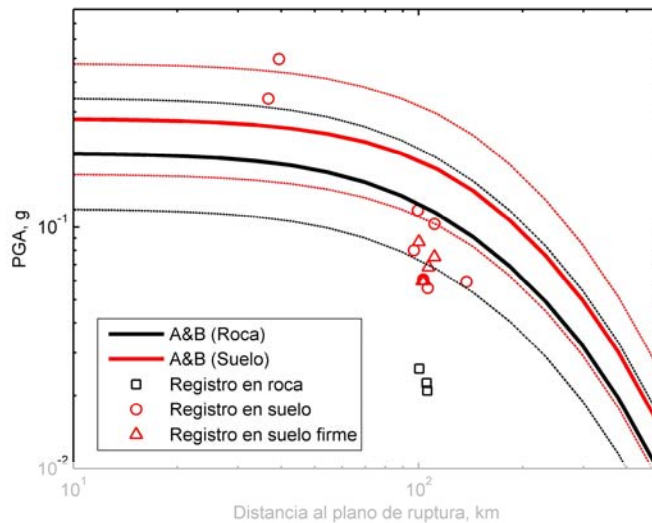


Figura 4: PGA versus distancia más próxima al plano de falla. La distancia al plano de falla está basada en el plano propuesto por Ji y Zeng (2007). Se muestra como referencia la predicción de PGA (valores medios y una banda de una desviación estándar) usando la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003). Véase la Tabla 1 para el tipo de suelo.

Evidencia adicional de los efectos de sitio se observa en las diferentes formas de los espectros de respuesta que se muestran en la Figura 5 correspondientes a cuatro estaciones ubicadas entre 96 y 111 km del plano de falla, las cuales están localizadas sobre tres diferentes tipos de suelo. Los efectos de sitio se expresan en amplificaciones significativas sobre bandas de períodos compatibles con la descripción del tipo de suelo (por ejemplo, depósitos superficiales rígidos en La Molina y suelos blandos en El Callao).

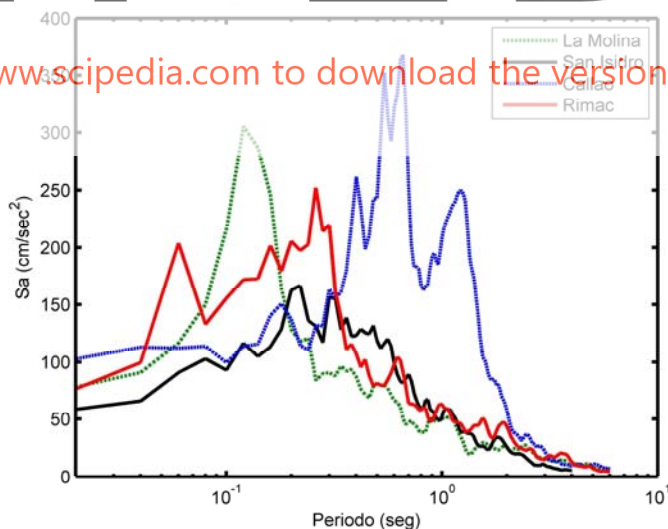


Figura 5: Aceleraciones espectrales de varios registros en Lima ubicados a distancias similares del plano de ruptura (aproximadamente 105 km).

Los acelerogramas para los registros disponibles mostrados en la Tabla 1, se pueden observar en <http://gees.usc.edu/GEER> y en la página Web de las instituciones administradoras de cada instrumento (ver Tabla 1). Los registros de La Molina (suelo) y El Callao (suelo blando) se muestran en las Figuras 6 y 7, respectivamente. Obsérvese que todos los registros están caracterizados por dos fases de aceleraciones, lo que concuerda con el deslizamiento sobre dos asperezas indicadas por la solución de falla finita (Figura 2). La Figura 8 muestra el espectro de Fourier para las dos fases del registro de La Molina. En esta figura se observa que la segunda fase del movimiento posee

mayor intensidad en todo el espectro de frecuencias; sin embargo, en las frecuencias bajas (períodos altos) el aumento es particularmente significativo.

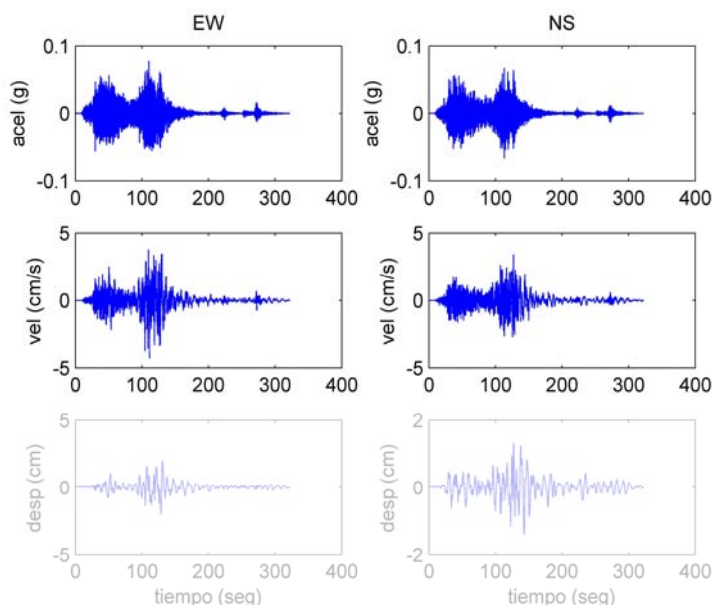


Figura 6: Historia de aceleraciones, velocidad y desplazamiento para el registro La Molina (suelo firme), Lima.

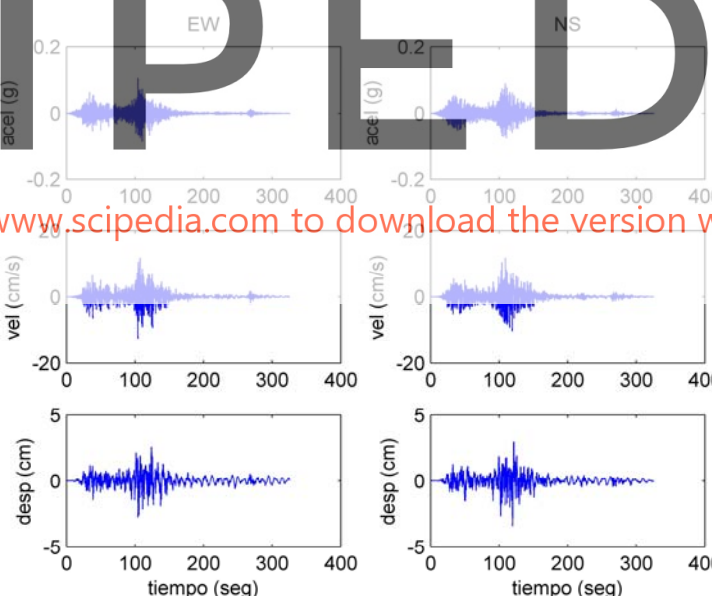


Figura 7: Historia de aceleraciones, velocidad y desplazamiento para el registro de El Callao (suelo blando) cerca de Lima.

Los efectos de sitio son particularmente notables al comparar los registros de las estaciones de El Callao y Rimac. Ambas están ubicadas a una distancia de 111.1 km del plano de falla, por lo que se podría esperar registros de similares características. La estación acelerográfica de El Callao está ubicada sobre suelo blando, mientras que la del Rimac está ubicada sobre una unidad geológica conocida como el Conglomerado de Lima que consiste en una grava densa con poca cementación. Al analizar la transformada de Fourier del registro de la estación Rimac (Figura 9), se observa una diferencia marginal en el contenido de frecuencias de cada fase, situación que se ve reflejada en los espectros de respuesta elástica para cada una de las fases siendo muy similar una de la otra. Cuando se analiza la transformada de Fourier del registro de El Callao (Figura 10), la diferencia entre ambas fases es patente pues la segunda fase posee una

intensidad significativamente mayor, específicamente en el rango de bajas frecuencias (períodos altos) cercanas a 1 Hertz (periodo de 1 segundo). Esta diferencia entre la primera y la segunda fase es también evidente al comparar los espectros de respuesta de ambas fases. La diferencia evidenciada entre las fases del registro de El Callao tendría su origen en el suelo blando sobre el cual está instalada la estación. El mecanismo probable que originó esta respuesta es la degradación cíclica del suelo durante la primera fase para luego comportarse de manera bastante más flexible durante la segunda fase. La degradación cíclica del suelo está probablemente asociada a la disminución de los esfuerzos efectivos producto del acumulamiento de exceso de presiones de poro y posiblemente a la deformación angular inducida durante la primera fase de aceleraciones.

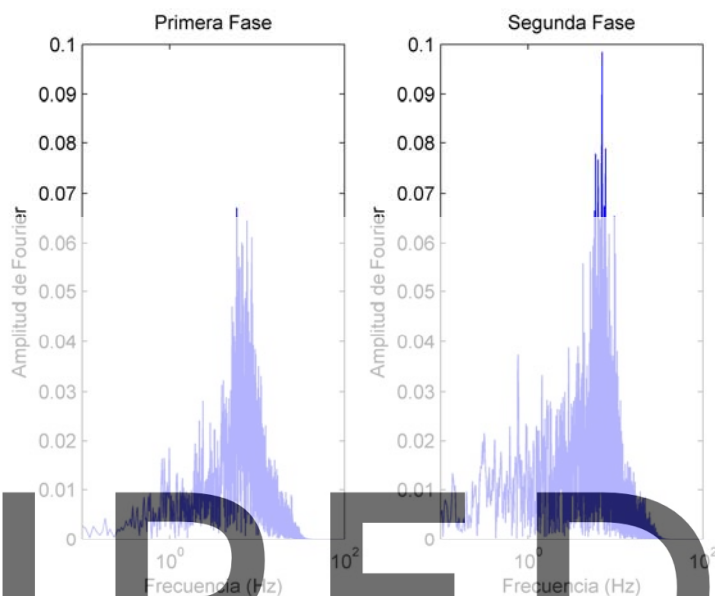


Figura 8: Transformada de Fourier de cada fase del registro de La Molina, Lima. Obsérvese la amplificación de las frecuencias bajas (< 1 Hz) en la segunda fase.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

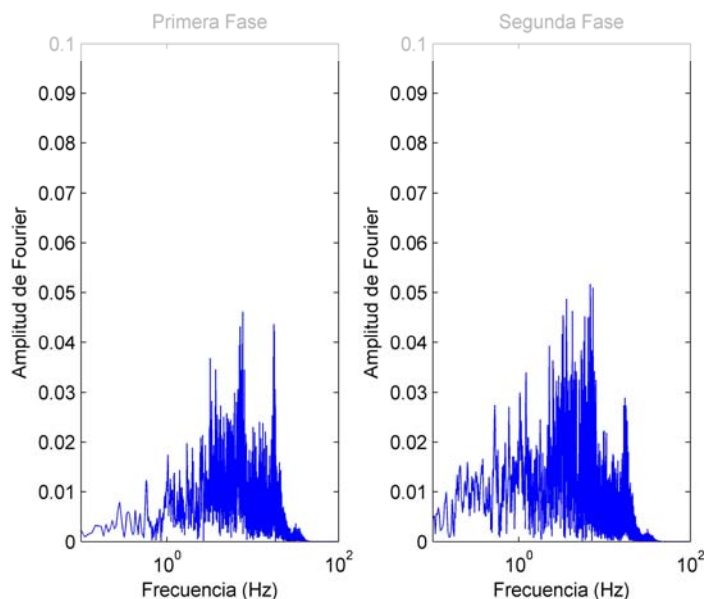


Figura 9: Transformada de Fourier de cada fase del registro de Rimac (CISMID), Lima. Obsérvese la baja amplificación de las frecuencias bajas (< 1 Hz) en la segunda fase.

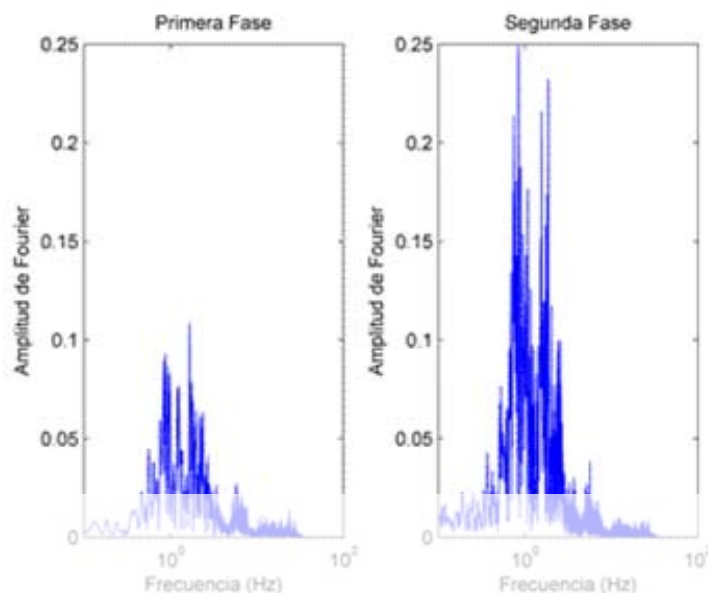


Figura 10: Transformada de Fourier de cada fase del registro de El Callao cerca de Lima. Obsérvese la significativa amplificación de las frecuencias bajas (< 1 Hz) en la segunda fase.

Todos los registros del sismo tienen una prolongada duración de movimiento fuerte. Por ejemplo, para el registro de La Molina, la duración significativa 5-95% (Trifunac y Brady, 1975) es de 101.3 segundos y la duración del movimiento mayor a 0.05g es de 98.6 segundos. Una duración en torno a 100 segundos es significativamente mayor a la esperada para sismos corticales superficiales de magnitud similar. La relación de atenuación de Abrahamson y Silva (1996) desarrollada utilizando datos de eventos corticales superficiales predice una duración de 43 segundos para sismos de M_w 8.0; no existe una relación similar para sismos de subducción.

LICUACIÓN DE SUELO

Descripción general / Attribution: scipedia.com to download the version without the watermark

El sismo de Pisco generó una amplia variedad de fallas del terreno por licuación. Daños significativos por licuación incluyen un desplazamiento lateral masivo que se extendió aproximadamente 3 km, un deslizamiento de talud de 400 m de largo inducido por licuación en el pie del talud, fallas espectaculares de fundaciones superficiales de edificios de baja altura resultando en asentamientos de hasta 0.90 m, numerosos terraplenes de carreteras que fueron dañados por desplazamientos laterales, colapso de postes de tendido eléctrico fundados en suelo licuado, rompimiento de ductos de agua y alcantarillado, y daños en instalaciones portuarias. La ocurrencia de licuación del suelo en cada uno de estos sitios fue confirmada por la presencia de conos de arena en la superficie y por la presencia de eyecciones de arena húmeda en grietas.

La distribución espacial de las evidencias de licuación observadas y reportadas en la costa central del Perú, comprende la zona que se extiende desde Villa, justo al sur de Lima y aproximadamente 90 km al norte del plano de ruptura (según la definición de Ji y Zeng, 2007), hasta Paracas en el sur, aproximadamente 24 km desde el plano de ruptura, e Ica en el Este, alrededor de 40 km del plano de falla. La misión de reconocimiento no se extendió al sur de Paracas. La evidencia de licuación más al norte que se pudo comprobar, en el vecindario de Villa en Lima, ocurrió en un área pantanosa. Un área pantanosa similar ubicada más al norte, en Ventanilla en el distrito de Lima, aproximadamente a 128 km del plano de ruptura, no mostró evidencia de licuación (Figuras 11 y 12).

La ocurrencia de licuación a lo largo de la costa está asociada a rellenos artificiales y depósitos marinos, eólicos y aluviales del Holoceno, compuestos de arenas y arenas limosas de forma y granulometría variables. Los depósitos marinos son terrazas escalonadas cubiertas por sedimentos aluviales a medida que progresan hacia el interior desde la costa. Los depósitos aluviales están asociados a abanicos y planicies de la descarga de ríos en el océano. El espesor de estos depósitos varía desde unos pocos metros hasta cientos de metros. Los depósitos eólicos varían en espesor y están generalmente compuestos de arena que va desde un gris oscuro a claro, con granulometría de gruesa a fina

(INGEMMET, 1999; Salazar y Landa, 1993; Fernández Dávila, 1993). A continuación se presentan más detalles para seis casos históricos que fueron documentados durante el viaje de reconocimiento.



Figura 11: Distribución espacial de las evidencias de licuación observadas por la misión de reconocimiento del GEER. Mapa base cortesía de Google Earth.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark



Figura 12: Acercamiento de la zona de Pisco y sus evidencias de licuación. Mapa base cortesía de Google Earth.

Caso histórico I: falla de talud en Jahuay

La falla de un talud de 400 m de largo fue inducida en Jahuay por la licuación en el pie de un talud de pendiente fuerte de aproximadamente 30 a 50 m de alto. La falla ocurrió cerca del kilómetro 188 de la carretera Panamericana, justo al sur de la caseta de peaje (aproximadamente a 40 km del plano de ruptura). En este lugar, la carretera corre justo a lo largo de la interfaz entre la terraza de un depósito marino del Holoceno y la Formación Cañete del Pleistoceno, un conglomerado de areniscas, limolitas y lutitas, con cementación débil a media (INGEMMET, 1999; Salazar y Landa, 1993). El material del talud que falló está formado por depósitos eólicos de arenas limosas (SM) sueltas y no plásticas, que cubrían la Formación Cañete. La terraza marina, pantanosa y plana se extiende aproximadamente 700 m desde la orilla del mar en el límite sur de la carretera Panamericana (véase la Figura 13). La falla de talud fue inducida por la licuación de los depósitos de la terraza marina en el pie de la Formación Cañete. La berma y el pavimento de calzada norte fue levantada unos 3 m como se observa en la foto de la Figura 14; esto se cree que ocurrió a causa de que parte del material fallado se habría enterrado bajo el terraplén de la carretera. Gran cantidad del suelo fallado cayó entre la carretera y el borde del talud sobre los 400 m de longitud del talud fallado. Un lugareño informó que la autopista al sur de la falla del talud había sido recientemente reparada y apropiadamente compactada; esto parece haber prevenido que la falla se extendiera hacia el sur.



Figura 13: Vista de la carretera Panamericana en la zona de la falla del talud de 400 m de longitud. Se pueden ver depósitos de terraza marina en la parte anterior y la Formación Cañete en la parte posterior.

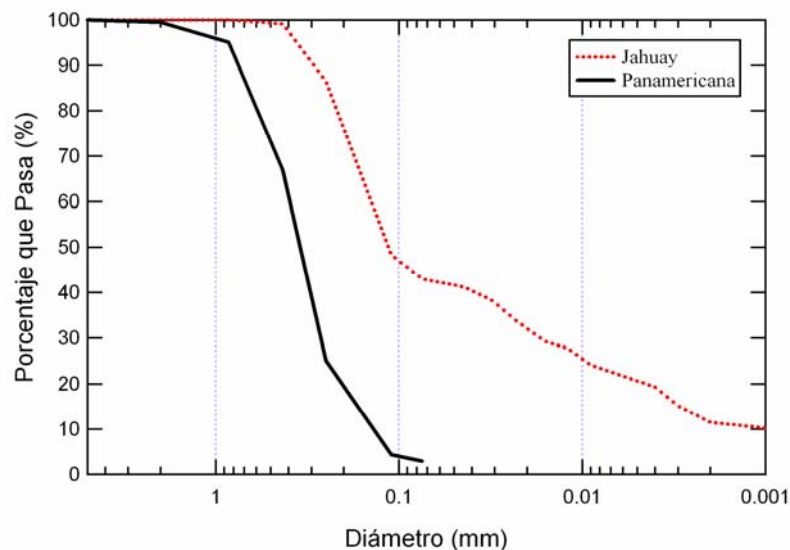


Figura 14: Daños en berma y pavimento de la calzada norte de la carretera Panamericana.

Fueron encontrados conos de arena en ambos lados de la carretera y una persona que vivía justo al sur del deslizamiento reportó agua y arena saliendo en gran cantidad del suelo durante el terremoto, alcanzando alturas de hasta 1 m. Un cono de arena hallado en el extremo sur de la falla de talud tenía grietas de contracción en el material perimetral, indicando la presencia de finos plásticos (Figura 15). Los finos fueron encontrados sólo en una capa delgada en lo más alto del material eyectado. Pruebas de laboratorio realizadas al material de este cono indicaron su clasificación como arena arcillosa (SC) conteniendo aproximadamente 43% de finos (11% de partículas del tamaño de arcilla) con un Índice de Plasticidad (IP) de 8 y un Límite Líquido (LL) de 25 (Figura 16). Sin embargo, hasta que investigaciones más detalladas se realicen en el sitio, permanecerá poco claro si el material fino plástico fue parte de la capa licuada o si fue mezclado con el material licuado en su camino a la superficie. También cabe destacar que un cono de arena en el lado opuesto del camino clasificó como arena mal graduada (SP) con menos de 3% de finos no plásticos (Figura 16).



Figura 15: Gran cono de arena con finos posiblemente licuados.



| Suelo deyectado | USCS | % Finos | LL | LP | IP |
|------------------------|------|---------|----|----|----|
| Jahuay (LMS-540) | SC | 43 | 25 | 17 | 8 |
| Panamericana (LMS-504) | SP | 2.9 | NP | NP | NP |

Figura 16: Granulometría y límites de Atterberg de suelos obtenidos de conos de arena en Jahuay (Olcese, 2007).

Caso histórico II: gran desplazamiento lateral en Canchamaná

Un importante desplazamiento lateral en dirección hacia el mar de una terraza marina, provocado por licuación, ocurrió en Canchamaná, a 2.5 km al norte de Tambo de Mora. El área desplazada aproximada fue de 1 km de ancho por 3 km de largo (Figura 17). El límite este del desplazamiento fue la interfase entre la terraza del Holoceno marino y la Formación del Pleistoceno de Cañete (INGEMMET, 1999). El límite sur parece estar definido por la interfaz de la terraza marina con un depósito de arena aluvial del Holoceno. El límite norte no se pudo definir claramente, pero parece haber sido influenciado por la presencia de trabajos en una curva de la carretera Panamericana. El desplazamiento lateral puede haberse extendido más al norte, pero esto no fue verificado. La elevación de la Formación Cañete es de aproximadamente 10 a 20 m sobre la terraza marina. La superficie de los depósitos de la terraza marina parece estar compuesta por una capa de suelo no licuable (arena débilmente cementada), y una capa inferior de suelo licuable (arena limosa). El espesor de la capa superior va desde aproximadamente 6 m en el lado este, a una delgada capa en la playa. La profundidad del nivel freático era variable en los dos lugares donde fue medida. Ambas mediciones fueron hechas en el lado este de la terraza marina cerca de la Formación Cañete. En un pozo existente ubicado en la zona sur del área desplazada (Figura 17), el nivel freático fue de 5.2 m de profundidad, y en un agujero abierto a aproximadamente 0.7 km al norte de este pozo, el nivel freático se registró a 2.0 m de profundidad. La pendiente hacia el oeste de la superficie de la terraza marina era de aproximadamente 1.6 a 2.1%.



Figura 17: Desplazamiento lateral del terreno asociado a licuación en Canchamaná. Mapa base cortesía de Google Earth.

En un largo considerable de la interfase entre la Formación Cañete y la terraza marina se registró un quiebre vertical de magnitud variable en la topografía. El desplazamiento relativo vertical máximo medido fue de aproximadamente 3 m, en la vecindad del camino rural que une Canchamaná con el pueblo de La Victoria (Figura 18). Además de este importante desplazamiento vertical, se registraron numerosas grietas de extensión paralelas a la línea de costa en la terraza marina, algunas de ellas de hasta 1 m de ancho. En general, el tamaño de las grietas (tanto en ancho como en

profundidad) decrecía desde la interfaz Formación Cañete-terrazza marina a la línea de costa. En los extremos del desplazamiento se constataron grietas perpendiculares a la playa mientras que en otros las grietas parecían seguir la topografía local.



Figura 18: Desplazamiento vertical producto del desplazamiento lateral del terreno en Canchamaná.

En el extremo norte del desplazamiento, un terraplén de relleno artificial de aproximadamente 8.0 m de alto fue construido sobre un drenaje natural; como consecuencia se observó licuación y desplazamiento lateral asociado a la terraza marina, provocando la falla del terraplén y de las estructuras de hormigón que se apoyaban sobre él. Conos de deyección de hasta 2.0 m de diámetro fueron encontrados cerca de la base de este terraplén, observándose grietas de retracción similares a las mostradas en la Figura 15. Estas últimas fueron encontradas en la base de la Formación Cañete sólo a 2 km de distancia, por lo que se estima muy probable que ambas fallas estén asociadas a la licuación del mismo material, ya que entre los dos lugares se encontraron conos de deyección y pequeñas distorsiones topográficas.

Con la información recabada hasta el momento es muy difícil estimar el desplazamiento total del desplazamiento lateral de la terraza marina porque ocurrió sobre un área muy extensa. Sin embargo, pescadores locales mostraron marcas del nivel del mar en la playa antes y después del evento sísmico, sugiriendo que la línea del agua se movió alrededor de 25 m hacia el oeste. Esta medición no es una estimación del desplazamiento lateral, pero se cree que el desplazamiento lateral de la terraza marina contribuyó a este cambio del paisaje. Un levantamiento del terreno a lo largo de la playa también fue observado, indicando que esto pudo haber contribuido al movimiento de la línea de costa.

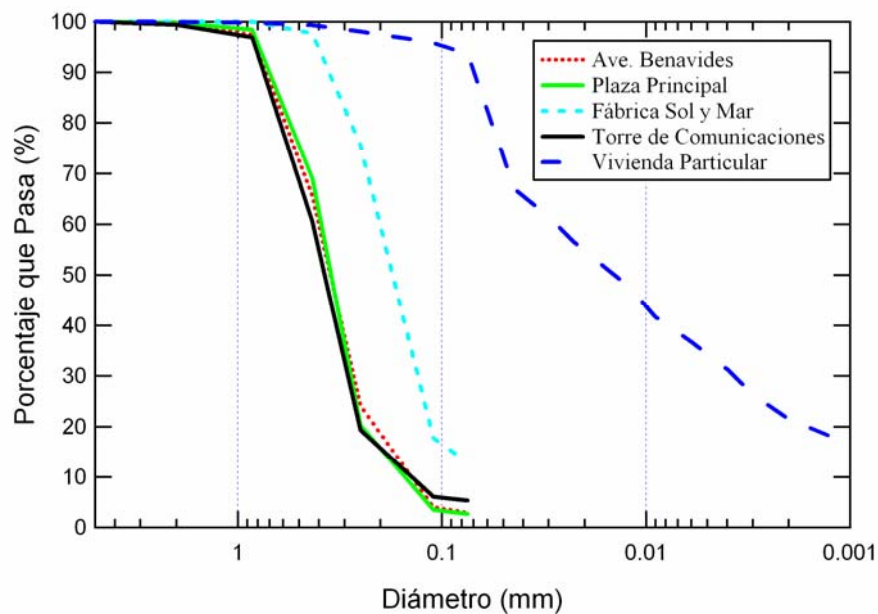
Caso histórico III: fallas de fundaciones superficiales en Tambo de Mora

En la parte noroeste de Tambo de Mora, distante aproximadamente 0.5 km de la línea de costa y 38 km del plano de falla, se documentaron fallas espectaculares de fundaciones superficiales provocadas por licuación de suelo. Tambo de Mora está ubicado sobre depósitos eólicos y aluviales del holoceno (INGEMMET, 1999), con nivel freático relativamente superficial. Evidencias de licuación, tales como conos de deyección pequeños y asentamientos menores, se encontraron en la mayor parte de la zona noroeste de la ciudad. Sin embargo, las casas de uno y dos pisos de la calle Alfonso Ugarte se vieron particularmente afectadas (por asentamientos excesivos). La zona afectada tiene una extensión de 300 m por la calle Alfonso Ugarte, espacio en el cual prácticamente todas las edificaciones tuvieron asentamientos iguales o mayores a 0.3 m, registrándose varias con asentamientos entre 0.7 y 0.9 m (Figura 19). Se encontró material de deyección en grandes cantidades en las grietas que se produjeron en la calle y dentro de las edificaciones que poseían pisos de hormigón no reforzado; en ellas el suelo licuado destruyó completamente el hormigón levantándolo hacia dentro de las edificaciones. El material de deyección encontrado, en la mayoría de los casos, correspondió a arenas grises, no plásticas, mal graduadas (SP a SM). Una excepción fue un limo plástico (ML, LL = 48) encontrado en el interior de una de las casas afectadas (Figura 20). La profundidad del nivel freático (NF) era de 0.3 m al momento de la visita del equipo del GEER; sin embargo, lugareños reportaron que antes del sismo el NF se encontraba entre 0.5 y 1.0

m de profundidad. Los mismos lugareños informaron que una mezcla de agua y arena salió expulsada del suelo durante el segundo pulso del movimiento, alcanzando alturas de hasta 1.0 m.



Figura 19: Asentamientos de aproximadamente 0.9 m en Tambo de Mora.



| Suelo deyectado | USCS | % Finos | LL | LP | IP |
|--------------------------------------|-------|------------|----|----|----|
| Ave. Benavides (LMS-507) | SP | 2.9 | NP | NP | NP |
| Plaza principal (LMS-550) | SP | 2.7 | NP | NP | NP |
| Fábrica Sol y Mar (LMS-509) | SM | 12.9 | NP | NP | NP |
| Torre de comunicaciones (LMS-505) | SP-SM | 5.3 | NP | NP | NP |
| Vivienda particular (LMS-542) | ML | 93.7 | 48 | 32 | 16 |

Figura 20: Granulometría y límites de Atterberg de suelos obtenidos de material de deyección en Tambo de Mora (Olcese, 2007).

Caso histórico IV: Las Lagunas

Las Lagunas es un complejo de casas en la playa ubicado a 71 km al sur de Lima y a aproximadamente 51 km del plano de ruptura. Esta área está ubicada en un depósito del holoceno marino reciente. El complejo consiste en casas de uno y dos pisos construidas de albañilería confinada. El daño estructural fue de ninguno a severo y estaba bien correlacionado con el grado de asentamiento de las fundaciones y el desplazamiento lateral asociado a la licuación del suelo subyacente. Muchas de las casas fueron construidas alrededor de lagunas artificiales creadas por medio de dragado de arena y dejando que el agua subiera a su nivel freático natural. Los bancos de las lagunas eran taludes cubiertos de pasto, con una pendiente estimada de 1.5H a 1V. En ellos se registraron evidencias claras de desplazamiento lateral de casas hacia las lagunas o hacia el océano, donde la pendiente era mucho menor. El desplazamiento observado variaba desde unos pocos centímetros para las casas junto al océano a casos que involucran 3.9 m de movimiento hacia las lagunas interiores (Figura 21). Algunas casas se asentaron tanto como 0.2 m. Al menos un desplazamiento lateral fue observado en los bancos de una laguna donde no había edificaciones cercanas. Adicionalmente, varias casas no mostraron evidencia alguna de movimiento y tuvieron un buen comportamiento sísmico, aún cuando estaban ubicadas cerca de la orilla del talud de una de las lagunas. En el tiempo limitado de la visita no pudieron ser descifrados patrones claros de la distribución espacial del daño por licuación dentro de la subdivisión. En varios lugares hubo presencia de arena eyectada, principalmente a lo largo de grietas en el terreno. La eyección era gris, fina, de arena uniforme con algo de limos no plásticos.



Figura 21: Desplazamientos laterales y fallas asociadas a licuación en el complejo Las Lagunas.

Caso histórico V: Puerto General San Martín, Pisco

El Puerto General San Martín fue inaugurado en 1970 y tiene capacidad para barcos de hasta 25000 toneladas de peso muerto. Está localizado en Punta Pejerrey, bahía de Paracas, a aproximadamente 30 km de la falla. El puerto está rodeado de pórfido granítico (roca intrusiva), el cual es parte del Batolito San Nicolás (INGEMMET, 1999; Fernández Dávila, 1993). El pórfido granítico tiene una matriz que va desde fino a grueso, con colores desde rosado a rojo oscuro cafésoso. Las instalaciones portuarias fueron construidas en terreno ganado al mar, como muestra la Figura 22a. El embarcadero tiene una cubierta de hormigón armado que está fundada en 780 pilotes tubulares de acero. El área de suelo ganado al mar del puerto se ha asentado con el correr de los años resultando en un movimiento diferencial entre las edificaciones soportadas por pilotes y el terreno circundante. La solución típica a este problema fue poner más relleno hasta nivelar la superficie del terreno ganado al mar. El sismo produjo la licuación del relleno, como evidenciaron los conos de arena encontrados y el desplazamiento lateral con grietas significativas de hasta 0.25 m de ancho y distorsiones verticales de hasta 0.8 m (véase la Figura 22b). La cubierta soportada por pilotes se inclinó levemente hacia el mar y las separaciones horizontales en las juntas de la cubierta fueron de hasta 0.5 m (Figura 23a). Las grietas del terreno se desarrollaron en forma paralela a la cubierta en la zona de suelo ganado al mar y fueron más severas cerca de la orilla (Figura 23b). Una tubería que corría a través del puerto dentro de una caja de concreto no resultó dañada en el sismo, a pesar del hecho que el terreno circundante se asentó sustancialmente. Se presume que la caja de concreto estaba soportada por pilotes. No se observaron grietas en el terreno natural cerca del muelle.

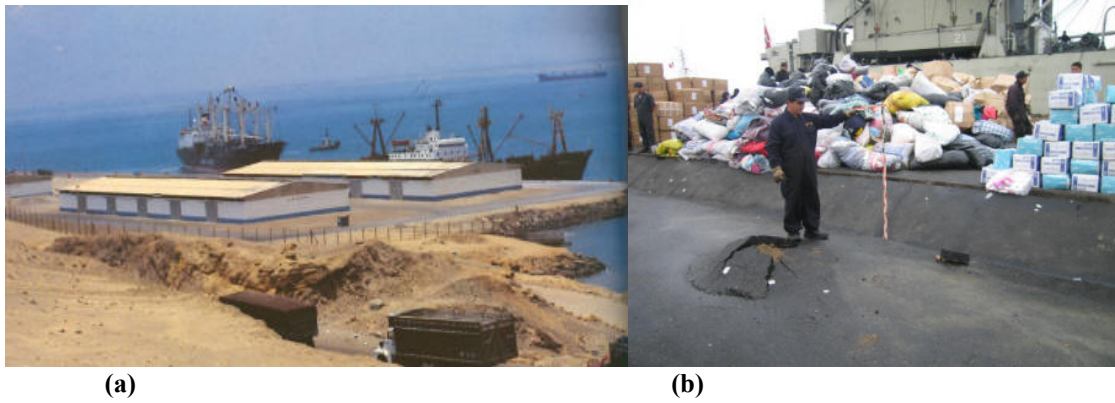


Figura 22: (a) Suelo ganado al mar; (b) Distorsión vertical de 0.8 m entre embarcadero y relleno artificial.

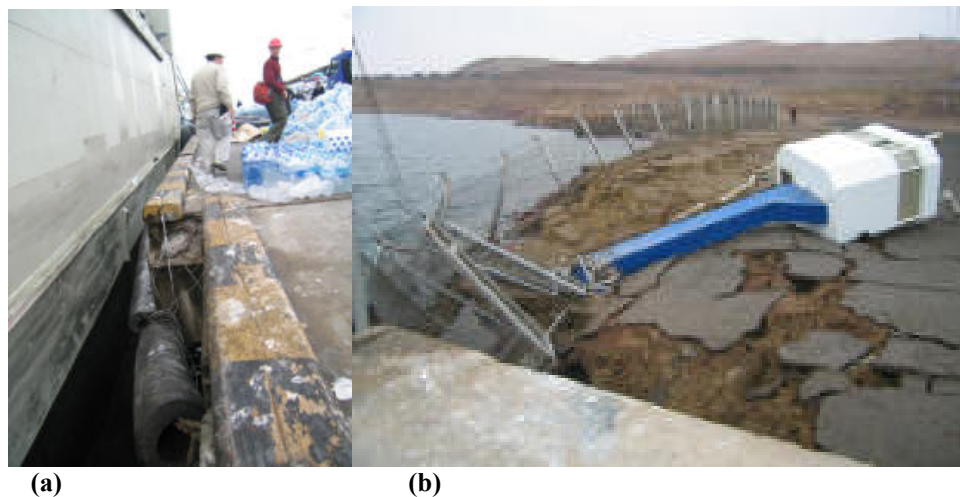


Figura 23: (a) Desplazamiento lateral permanente en las juntas del embarcadero. (b) Grietas en relleno.

FALLAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Los deslizamientos de talud desencadenados por el sismo fueron observados durante los viajes realizados por el segmento Lima-Ica de la carretera Panamericana (orientada norte-sur) y en la carretera 024A orientada este-oeste. El trayecto por la carretera 024A comenzó en la costa cercana a Pisco y continuó hacia el este por aproximadamente 110 km y hasta una elevación de aproximadamente 4500 m. Se estima que en total el sismo provocó miles de deslizamientos de tierra, siendo la mayoría de estos deslizamientos no-coherentes (“disrupted landslides”), incluyendo caídas de rocas, deslizamientos de roca, fallas de taludes de suelo, y avalanchas de suelo. Para descripciones detalladas de estas categorías se puede ver el artículo de Keefer (1984). Fallas de talud ocurrieron en terrenos naturales y alterados (cortes de caminos, por ejemplo). Reportes del Departamento de Carreteras indican que las caídas de roca ocurrieron sobre una extensa región alcanzando zonas tan al norte como el Departamento de Chachapoyas, a aproximadamente 700 km desde el plano de falla, aunque se presume que estas últimas involucraron volúmenes mínimos de roca. Como fue expuesto anteriormente, se registraron numerosos desplazamientos laterales inducidos por licuación, mayoritariamente a lo largo de la costa de la región epicentral. Los párrafos siguientes discuten varios deslizamientos significativos.

La Figura 24 muestra una avalancha de suelo mixto que se piensa fue inducida por licuación, lo que habría producido pérdida de rigidez del suelo o movimiento cerca del pie del talud. El deslizamiento ocurrió cerca de Jahuay a un costado de la carretera Pan-Americana, la cual fue parcialmente bloqueada en este lugar después del sismo. Esta falla fue discutida con mayor detalle en la sección de licuación.

La caída masiva de rocas que se muestra en la Figura 25 tuvo lugar en la Carretera 024A a aproximadamente 44 km del plano de falla a una elevación de aproximadamente 500 m. El deslizamiento de rocas, que cerró completamente la carretera por 3 días, estaba en el proceso de ser removido durante la visita al sitio el 23 de agosto de 2007. El personal de la carretera estimó que 8000 m³ de material fue removido previo a esta fecha. El volumen total del deslizamiento se estima fue sobre los 20000 m³. El macizo rocoso involucrado en la falla posee fracturas sin relleno y con orientación desfavorable. Los mapas geológicos indican que las rocas de la zona son Monzonitas del Cretáceo Inferior. La mayoría de las rocas falladas consistían en bloques entre 0.2 y 2.0 m de diámetro, aunque también se encontraron varios bloques de 3.5 m de diámetro en el camino. Después de cubrir la carretera, cayeron detritos sobre un acantilado localizado al sur de la carretera, los que terminaron por bloquear un canal de agua. Durante la visita y con el afán de restaurar el flujo en el canal, detritos que incluían bloques de varios metros de diámetro fueron dinamitados. Vale la pena destacar que, aparte de los cortes verticales en la carretera, esta unidad geológica tiende a meteorizarse formando pendientes de inclinación moderada (estimada entre 35 y 50 grados), la que evidenciaba poco o ningún signo de inestabilidad durante el terremoto.

La Figura 26 muestra la parte superior de uno de los dos deslizamientos de rocas adyacentes que ocurrieron en terreno natural (sin cortes) a lo largo de la carretera 024A con una elevación aproximada de 2250 m, y a aproximadamente 65 km del plano de falla. El cono de detritos fue de 40 m de ancho en su base y se extendió a una altura estimada de 150 m. El macizo consiste de roca ígnea con fracturamiento moderado, no persistente. Los detritos de la roca fallada, que consistían en bloques de hasta 4 m de diámetro, cayeron a un río grande restringiendo un poco (pero no bloqueando) el flujo de agua.

El deslizamiento de suelo y rocas que se muestra en la Figura 27 fue encontrado a una elevación de 2020 m a lo largo de la carretera 024A. La distancia más próxima al plano de falla se estimó en 65 km. Una cantidad significativa de detritos del deslizamiento cubrió completamente la superficie del camino después del sismo, cerrando la carretera en este lugar. Los restos fueron removidos para permitir el paso de una línea de tráfico antes que el equipo de reconocimiento visitara el sitio. El talud estaba constituido por un depósito sedimentario con grandes clastos de rocas ígneas (de hasta 1 m de diámetro), semiredondas en una matriz de suelo limo-arenoso. Cortes cercanos y estables en este mismo material tenían inclinaciones entre los 60 y 65 grados. En contraste con muchos de los deslizamientos de tierra vistos en la región, este deslizamiento de roca y suelo tuvo significativamente más desplazamiento, para finalmente caer sobre el camino y el cañón ubicado a la derecha del camino. Es importante notar que una falla similar ocurrió en la pared del cañón opuesta a la carretera en el mismo material, pero sobre un talud natural.



Figura 24: Avalancha de suelo en la carretera Panamericana.



Figura 25: Deslizamiento de rocas en la carretera 024A.



Figura 26: Deslizamiento de rocas en talud natural.



Figura 27: Deslizamiento de suelo y roca en la carretera 024A.

CONCLUSIONES

Observaciones geotécnicas realizadas después del sismo de Pisco del 15 de agosto del 2007 en el Perú mostraron varios casos históricos de licuación que son importantes por sus características poco comunes. Es así el caso del desplazamiento lateral de la terraza marina en Canchamaná y de los asentamientos observados en estructuras livianas en Tambo de Mora, así como también casos de licuación y desplazamiento lateral que habrían ocurrido con bajas intensidades de movimientos del terreno, como es el caso de Villa, al sur de Lima. Este trabajo presenta un resumen de las observaciones realizadas durante una visita posterior al sismo, las cuales pueden servir como base para un análisis más extenso de los efectos aquí detallados. En particular, se resalta el hecho que la larga duración de los movimientos fuertes de terreno pueden haber sido los causantes de la gran extensión de fallas por licuación observadas en la zona mesosísmica.

AGRADECIMIENTOS

El viaje a Perú para realizar el reconocimiento de daños sísmicos fue coordinado por la organización de Ingeniería Geotécnica de Reconocimiento Sísmico (GEER) con financiamiento de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (“National Science Foundation”, NSF). También se recibió apoyo para el viaje del “Earthquake Engineering Research Institute” (EERI) bajo el proyecto “Learning from Earthquakes” de la NSF. Se reconoce también el apoyo recibido de la Pontificia Universidad Católica de Lima que ayudó con la organización del trabajo de reconocimiento. El personal del Centro Peruano Japonés de Investigación y Mitigación de Desastres (CISMID) y del Instituto Geofísico del Perú (IGP) contribuyó observaciones importantes sobre el sismo y agradecemos su colaboración. Fueron muchas las personas que colaboraron en nuestro trabajo: a todas ellas les extendemos nuestro agradecimiento, sus nombres se omiten por falta de espacio.

El material presentado en este trabajo está basado en trabajo financiado por la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NSF) bajo el proyecto No. CMMI-0323914. Todas las opiniones, descubrimientos, conclusiones o recomendaciones que se incluye en este trabajo son hechas por los autores y no reflejan necesariamente la opinión de NSF.

REFERENCIAS

Aguilar Bardales, Z., y Alva Hurtado, J. (2007). “Microzonificación Sísmica de Lima”, Presentación en la Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Atkinson, G. M. y Boore, D. M. (2003). "Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 93, Nro. 4, pp. 1703-1729.

Fernández Dávila, M. (1993). "Geología de los Cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova: Hojas 28-K, 28-L, 29-K, 29-L, 29-M", *Boletín del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Serie A: Carta Geológica Nacional* (47), Lima, Perú.

INDECI (2007). Informe de Emergencia N° 349 13/11/2007 / Coen-Sinadeci (Informe N° 67). Instituto Nacional de Defensa Civil, Lima, Perú.

INGEMMET (1999). "Carta Geológica Nacional – 501 Cuadrángulos Geológicos Digitales de la Carta Nacional 1960 – 1999 República del Perú – Sector Energía y Minas – Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Lima, Perú.

Ji, Z. y Cheng, Y. (2007). "Preliminary Result of the Aug 15, 2007 Mw 8.0 Coast of Central Peru Earthquake", web report: http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2007/us2007gbcv/finite_fault.php.

Keefer, D. K. (1984). "Landslides caused by earthquakes", *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 95, pp. 406-421.

Lazares La Rosa, F., Almora, J.P., López Vásquez, J., Cabrejos Hurtado, J.J. y Piedra Rubio, R. (2007). "Análisis de acelerógrafos del sismo de Ica del 15 de agosto del 2007", Presentación en la Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Olcese, M. (2007). "Investigación geotécnica sobre el sismo del 15 de agosto del 2007", Expediente 07-285 del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Salazar, Hu. y Landa, C. (1993). "Geología de los Cuadrángulos de Mala, Lunahuana, Tupe, Conayca, Chíncha, Tantara y Castrovirreyna: Hojas 26-J, 26-K, 26-I, 26-M, 27-K, 27-I, 27-M", *Boletín del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Serie A: Carta Geológica Nacional* (44), Lima, Perú.

Tavera, H. y Bernal, I. (2005). "Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste del Perú", Volumen Especial No. 6 Alberto Giesecke Matto, *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, pp. 89-102.

Tavera, H., Bernal, I., y Salas, H. (2007). "El Sismo de Pisco del 15 de agosto, 2007 (7.9Mw), Departamento de Ica - Perú", *Boletín de la Sociedad Geológica*, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Trifunac, M.D. y Brady, A.G. (1975). "A study of the duration of strong earthquake ground motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 66, Nro. 4, pp.139-162.

United States Geological Survey, USGS (2007). "Earthquake Summary: Magnitude 8.0 – Near the Coast of Central Peru", portal: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2007/us2007gbcv/#summary> (visitado el 11/9/2007).